2013 年 10 月 13 日

～2013 年スイス実習レポート～

ローヌ氷河湖における氷塊の挙動と水準変動

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻　修士１年　前田英俊
北海道大学環境科学院生物圏科学専攻　修士１年　富安信
北海道大学生命科学院生命科学専攻　修士１年　藤田拓矢

1. はじめに

氷河とは降雪によって雪や氷が堆積し、圧縮され重力により流動する巨大な氷の塊である。地球温暖化による気温上昇により氷の消耗量が涵養量を上回り、氷河の衰退が起きていることから氷河への関心が高まっている。氷河には南極大陸やグリーンランドの広大な面積を覆う氷床と、山岳地にできる山岳氷河がある。山岳氷河は人々の生活と密接に関係している。氷河の融解水は生活用水や農業用水、水力発電等の工業用水等に利用されている。また氷河は恩恵をもたらすだけではなく、災害という危険性も持っている。具体的な災害としては、氷河湖という氷河の浸食によって生じた凹地や、氷河の堆積によってせき止められた所に水がたまってできた湖の決壊による洪水などがある。

国土の約70%が山脈に覆われているスイスでは数多くの山岳氷河が存在しており、恩恵を受けると共に、常に氷河湖決壊などの災害に備えておかなければならない。本研究で対象としたローヌ氷河は氷河としての研究価値があるだけでなく、ヨーロッパで最も大きな川の一つであるローヌ川の水源である。また観光資源としてもスイスの人々にとって大切な山岳氷河の一つである。ローヌ氷河はスイスアルプス中央部グリムゼル峠とフルカ峠の間に位置する全長約8ｋｍ、氷河面積約15.94㎢、体積2.063㎦の温暖谷氷河である（Farinotti et al., 2009）。1850年ごろからローヌ氷河の急激な後退が観察され、過去70年の間に約50m薄くなっていることが分かっている（Sugiyama et al., 2007）。氷河が融解することにより、ローヌ氷河末端には氷河湖が形成されている。氷河湖による末端の融解はカービングと並んで消耗の原因の一つとして考えられている。また氷河の縮退に伴い氷河湖が拡大し大規模な水害を生じる危険性が考えられている。実際に起きた氷河湖決壊による洪水被害として、ブータンでは1994年にルゲ湖が決壊し建造物等に被害がでたという報告がある（Watanbe er al.,1996）。現在においてもブータンには決壊の可能性がある氷河湖が数多く存在している。衛星等による観測や危険度評価を行っているが基準があいまいである、といった問題が挙げられている。

以上の背景を受けて本研究では、ローヌ氷河前縁に形成された湖にて水圧や水温、周囲の気温の測定、湖面の氷塊の動きのモニタリングを行った。得られたデータを解析してその詳細を議論することで、氷河末端の消耗プロセスや氷河湖決壊のメカニズム、危険な時間帯に関する有用な知見を示し、大規模な水害を防ぐ一助になることを目的とした。

２．観測方法

2-1 地点

観測は、2013年9月5日～8日にスイスアルプスの中央部にあるフルカ峠の近傍、ローヌ谷に位置するローヌ氷河(図1)にて行った。図の破線で示した位置に形成された氷河湖(図2)を対象とした。それぞれの計測機器は図3に示すように、水位・水温データロガーは赤の点、温度データロガーは青の点、またインターバルカメラは緑の点の位置に設置した。

図 1. ローヌ氷河地形図

図 2. 氷河末端部の氷河湖

図 3. 各計測機器の設置場所

2-2 装置

<u>水圧・水温計測</u>

湖の水位と湖水温の測定には、onset computer 社製の U20 水位・水温ロガーを用いた。水深 4m および 76m 仕様のものを各 1 機使用して、水中と大気中の圧力変化を測定した。装置の概要を図 4 に、 仕様の詳細を表 1 に示す。得られたデータの解析には、同上社製の解析ソフトである HOBOware Pro を使用した。

表 1. HOBO U20 水位・水温データロガーの仕様

水位測定

型番	CO-U20-001-04	CO-U20-001-03
計測範囲	4m	76m
工場校正範囲	69~145hPa	69～850kPa
精度	±0.075%FS、±0.3cm	±0.05%FS、±3.8cm
分解能	<0.02kPa、0.14cm	<0.085kPa、0.87cm
破損圧	310kPa、18m(水深)	1200kPa、112m(水深)

温度測定

計測範囲	-20℃～50℃
精度	±0.37℃@20℃、±0.5℃(-5～50℃)
分解能	0.1℃@20℃、0.2℃(-5～50℃)、10bit

共通仕様

記録点数	21、700 点(圧力+温度セット)、64kB 不揮発性メモリ
イベント記録	ホスト PC 接続時、バッテリー低下時
応答速度	水位：1 秒（90%） 温度 3.5 分（90%）
使用環境	水中、空気中、耐油・耐溶剤ハウジング
材質	316 ステンレススチール(U20-001-01-Ti はチタンハウジング)、Viton O-リング、セラミック圧力センサー
バッテリー寿命	5 年(1 分以上のロギングインターバルでの代表的使用例)、オンセット社工場にて交換可
バッテリー状態表示	PC 接続時に確認可 バッテリー経時電圧を記録可
動作確認インジケータ	本体付き赤色 LED にて表示
サンプリング間隔	1 秒～18 時間内自由設定(固定、マルチプルレートサンプル機能付き)
スタートモード	即時スタート、スタート時刻予約
データ回収モード	計測中オフロード、計測ストップ後オフロード
時間誤差	±1 分/月(0～50℃)
寸法・質量	25×150ｍｍ/210g ※U20-001-01-Ti は 140g

気温計測

ローヌ氷河周辺の気温の測定には、日置電機株式会社製の温度データロガーLR5011を用いた。装置の概要を図 5に、 仕様の詳細を表2に示す。得られたデータの解析には、同上社製のデータ収集器付属ソフトを使用した。

表2. LR5011温度データロガーの仕様

名称・型式	温度データロガー[LR5011]
機能	温度1ch (※オプション温度センサ別途必要)
測定項目	外付け温度センサで温度測定。測定対象に応じてセンサを選択。
測定範囲	-40.0℃～180.0℃ ※センサの種類によって制限されます
確度温度	±1.0℃ at 35～70℃、±0.5℃ at 0～35℃、±1.0℃ at 35～70℃、±2.0℃ at 70～120℃、±5.0℃ at 120～180℃
防塵防水構造	IP54 (防滴構造)
使用温湿度範囲	-20～70℃ 、 80%rh 以下(結露しないこと)
寸法・質量	79(W) × 57(H) × 28(D)mm、 105g
電源	単3 形アルカリ乾電池(LR6) × 1
付属品	スタンド、単3 形アルカリ乾電池(LR6) × 1、 取扱説明書、 操作ガイド
電池寿命	約2年(記録間隔1分、省電力モード、瞬時値記録、環境温度20℃) 約2ヶ月(記録間隔1秒、 省電力モード、 瞬時値記録、 環境温度20℃)

共通仕様

記録間隔	1、2、5、10、15、20、30秒 / 1、2、5、10、15、20、30、60分 *パルスロガー[LR5061]のみ上記プラス「1日」間隔あり
記録方式	2種類より選択可能　ワンタイム記録：メモリフル時記録動作停止 エンドレス記録：メモリフル時古いデータから削除して上書き保存
記録モード	瞬時値記録：記録間隔ごとの瞬時値を記録 統計値記録：1秒間隔で測定し、記録間隔ごとの瞬時値、最大値、最小値、平均値を記録　　*パルスロガー[LR5061]は記録間隔内のパルス数を記録。統計記録はない。
記録容量	瞬時値記録：1chあたり60、000データ　統計値記録：1chあたり15、000データ
表示内容	測定値、記録間隔、日付、時刻、アラーム、電池残量、記録データ数、最大値、最小値など

記録開始方法	本体キー操作で開始 Or パソコン/データコレクターからの予約時刻で開始
記録停止方法	本体キー操作で停止 Or パソコン/データコレクターからの予約時刻で停止 Or タイム記録方式設定時はメモリフル時に停止
記録保存機能	常に1回前の記録データをバックアップ
バックアップ	電池消耗時も記録データ / 設定条件 をバックアップ
その他	30秒以内の電池交換後記録継続（交換中は記録休止）
インターフェース	通信アダプタ[LR5091]、データコレクタ[LR5092] と赤外線通信

インターバルカメラ観測

氷河湖の挙動の観察には、Brino社製のGARDENWATCHCAM V1.0を用いた。装置は氷河湖が見渡せる高台の地点に2機設置し、氷河湖の水面の挙動を撮影した。装置の概要を図 6に、 仕様の詳細を表3に示す。

表３． GARDENWATCHCAM V1.0の仕様

画素数	1.3メガピクセル
焦点距離	マクロモード：約50㎝、通常モード：約1.0m～
動画フォーマット	AVI（音声なし）
撮影間隔	プリセット：1分、5分、30分、1時間、4時間、24時間 カスタム：5秒から11時間59分
記録画素数	1、280×1、024画素
記録媒体	USBフラッシュドライブ（8GBまで対応）
電源	単三乾電池×4本
電源持続時間	4～6ヶ月（撮影頻度により異なる）
大きさ (幅)×(高)×(奥行)	9.3×19.2×5.3cm
質量	約260g（本体のみ）

図 4. HOBO U20 水位・水温データロガー

図 5. LR5011 温度データロガー

図 6. GARDENWATCHCAM V1.0

2-3 手法

<u>水圧計測</u>

前述の水位・水温ロガーを二台使用し、図 3 に示す地点で、氷河湖中とすぐそばの基盤岩上での圧力を測定した。湖中の計測は、長さ約 2m の木材にデータロガーをビニールテープで巻いて固定し、湖へ続く岩盤に添わせて水中に入れることで実施した(図 7,8)。また木材が浮かび、データロガーが空気中に出ないように、木材は付近にある石で固定した。基盤岩上での計測は大気圧を測定するために水面から少し離れた岩盤の境に設置した(図 9)。計測は 9 月 5 日 15 時から、9 月 8 日 12 時まで行い、5 分毎にデータの記録を行った。

図 7. 木材への固定の様子
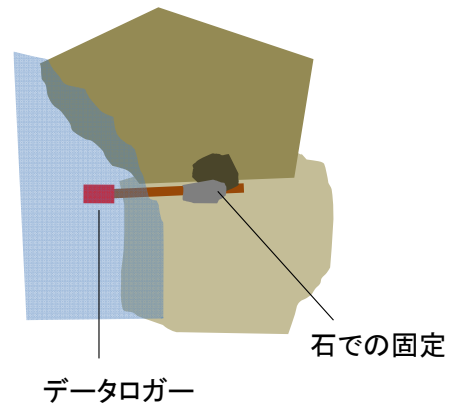
図 8. 水中への設置図

図 9. 大気圧測定用ロガーを岩盤上に設置した様子

<u>温度計測</u>

前述の温度データロガーを使用し、図 3 に示す地点で、気温を測定した。機器は、設置地点付近の看板の支柱に固定し（高さ約 30cm)、雨や風の影響を無くして、気温の測定ができるように、機器のセンサ部分を図 10 の様に円柱状のカバーで覆った。また本体部分も防水防塵のためにプラスチックの容器で覆った．計測は、水圧の計測と同じく、9 月 5 日 15 時から、9 月 8 日 12 時まで行い、5 分毎にデータの計測を行った。

図 10. 温度データロガー設置の様子
（上：センサ部分 下：データロガー本体）

インターバルカメラ計測

前述のインターバルカメラを 2 機使用し、図 3 に示す地点で、氷河湖における可視光で観測が可能な日中の変化を観測した。機器の設置は、いずれのカメラも視野に氷河湖全体が納まるように固定した（図 11、12）．観測は、9 月 5 日の 18 時から 9 月 8 日の 11 時まで行い、10 分毎に撮影を行った。

図 11. インターバルカメラの設置

図 12. 設置地点からのカメラ視点

2-4 データ解析

それぞれの機器から今回取得できたデータは以下の表の通りである。またすべての機器で、計測開始から回収までの全期間のデータを取得できた。

表 4.　取得されたデータ

機器	取得データ	データ時間
水位・水温データロガー(氷河湖中)	氷河湖水圧、水温	69 時間
水位・水温データロガー(岩盤上)	大気圧、氷河湖周辺気温	69 時間
温度データロガー	気温	69 時間
インターバルカメラ	氷河湖の湖面画像	65 時間

データロガーに取得されたデータは、まず時系列に沿った連続データとし、それぞれ日周的な変化の傾向を検証した。またインターバルカメラの画像においては、時系列に画像を並べ、0.1 秒間隔の動画を作成することで、その変化の傾向を検証した。

上記の解析の後、同時刻における水圧や水温、湖面の挙動といった複数のデータを並べることで、その変化の傾向を比較・照合した。最終的に、環境要素と湖面の挙動との関わりから、氷河湖がどのような変化をしているか考察し、その関連災害を防ぐための提言を行った。

3.結果

3-1 水圧

取得されたデータを図 13 に示す。図は、横軸に時間、縦軸に水圧の値をとっている。水圧は主に、観測 1、2 日目に大きく増減し、午後 17 時~18 時の夕刻の時間帯に最大値となる 3kPa の値を示した。夕刻を過ぎると水圧は減少に転じ、翌日の午前 10 時や 11 時の昼前の時間帯に、最小値となる 0kPa の値を示した。しかし、3 日目は夕刻から減少し始めた水圧が、夜間に一時的に増加する様子が見られた。
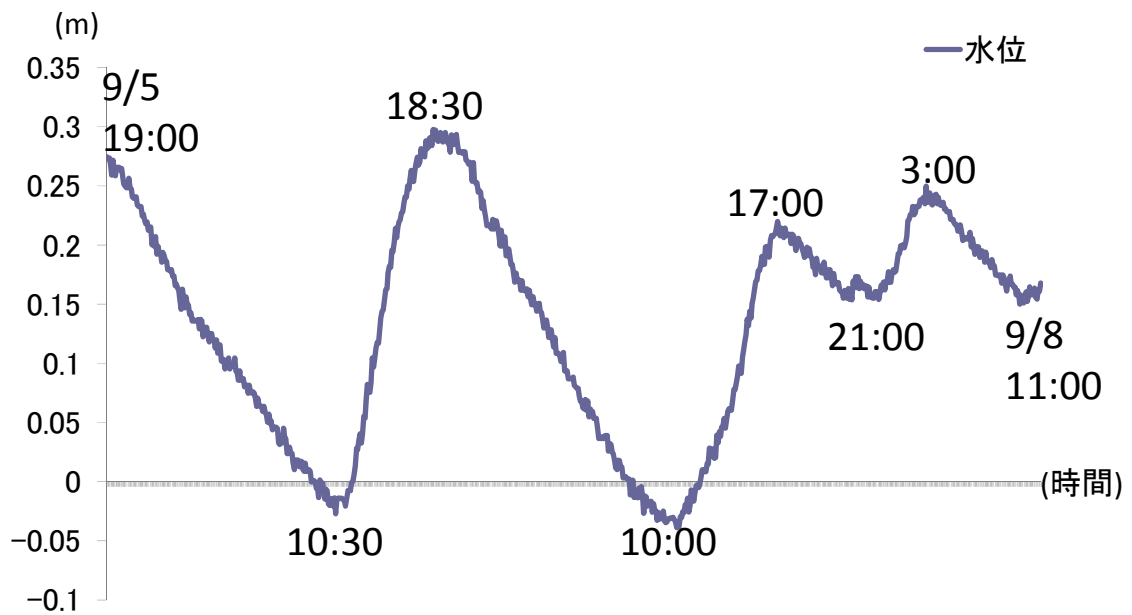
図 13. 水位の経時変化

3-2 水温・気温

取得されたデータを図 14 に示す。図は、横軸に時間、縦軸に温度の値をとっており、それぞれ氷河湖内の水温、氷河湖周辺の気温、調査地の気温の変化を示している。まず、気温については、水圧同様に大きく増減し、午後 14 時~15 時の時間帯に、最大値となる 18~20℃の値を示した。また夕刻、夜間と減少を続け、翌日の午前 5 時や 7 時の朝方の時間帯に、最小値となる 7~8℃の値を示した。次に水温については、夜間から朝方にかけて，一定の値を取りつづける傾向にあった．また，日中から徐々に値が増加し，最大値が午後 14 時~15 時の時間帯に現れており，その増減の傾向は，気温の変化と大まかに同調していた．しかし、その変化の幅は、最大値と最小値の差でも 1~2℃しかなく、小さいものであった。
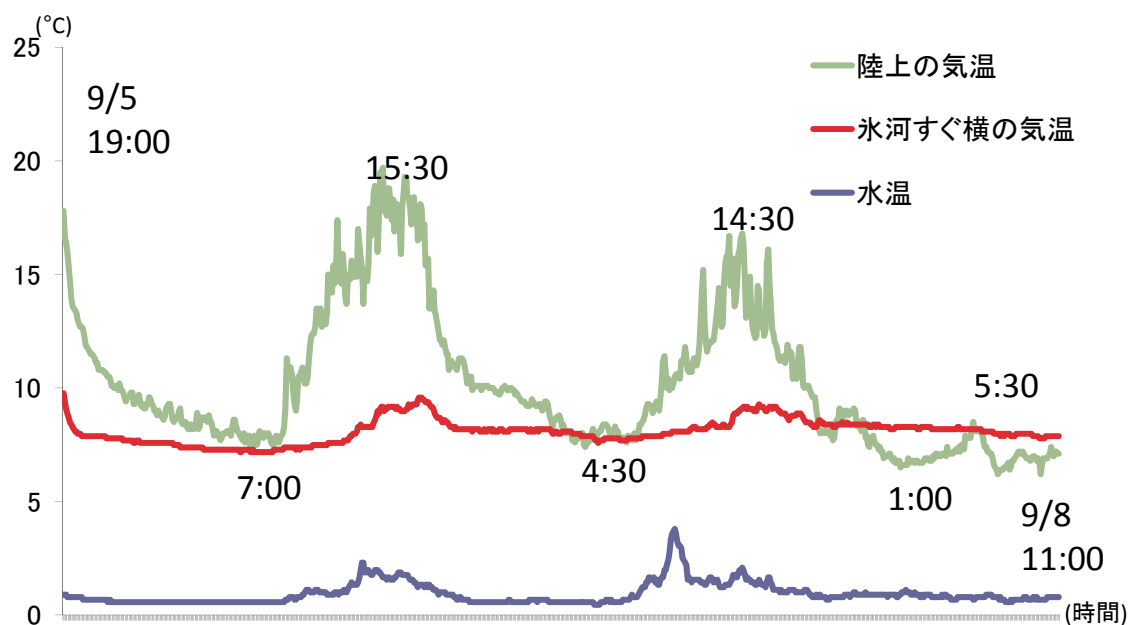
図 14. 水温・気温の経時変化

3-3 水圧と気温・水温

またここで、前述の水圧のデータと、同時刻における気温・水温のデータを並べて比較した(図 15)。主な傾向としては、気温・水温の変化に 2~3 時間遅れるようにして水位の変化が起きている傾向にあった。
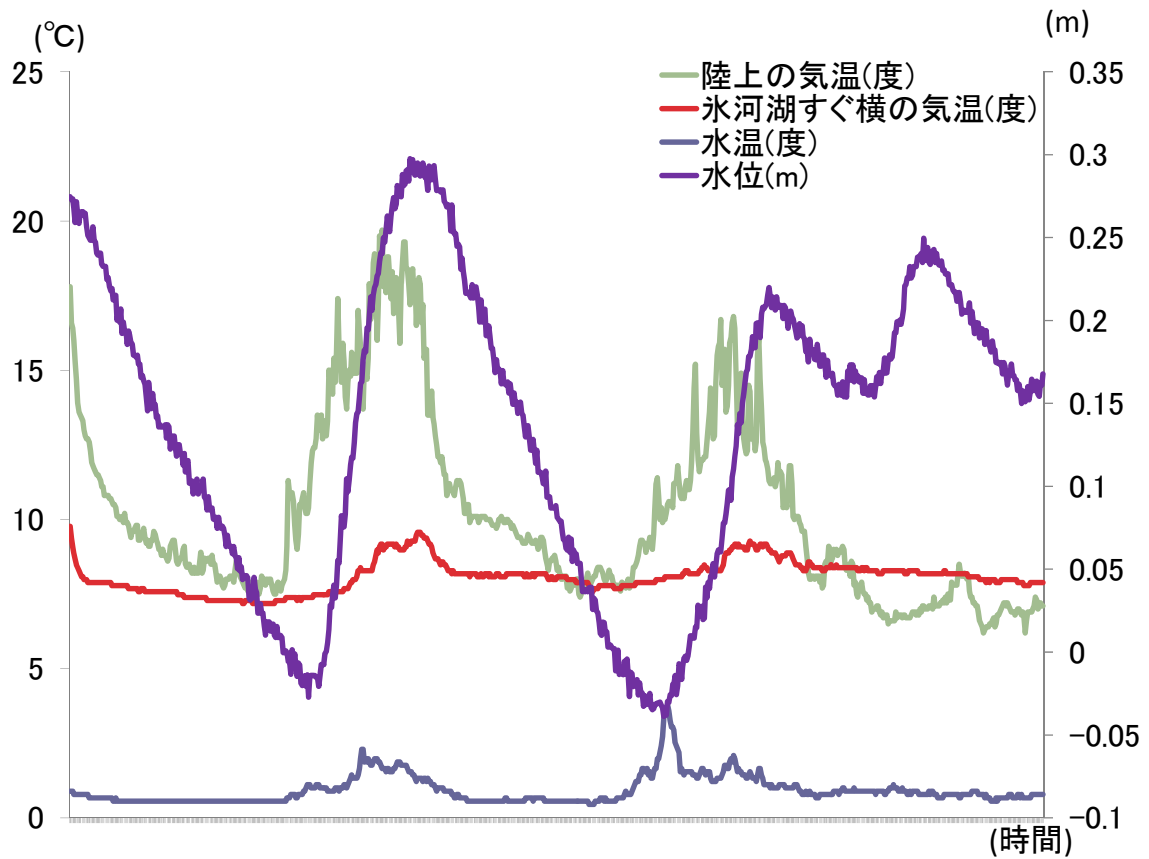
図 15. 水圧と水温・気温の比較

3-4 湖面の挙動

最後に湖面の挙動については、時間帯によって浮氷が大きく移動しており、氷河の先端方向にも、氷河湖の流出口方向にも、移動する様子が見られた(図 16, 17)。ここで、水圧と湖面の挙動について、同じ時間帯におけるデータを並べてみると、水圧の増加する昼前から夕刻にかけては、浮氷が氷河先端方向へ移動する傾向にあり、逆に水圧の減少する夕刻から翌日の昼前にかけては、浮氷が氷河湖流出口方向へと移動する傾向にあった(図 18)。

図 16. 氷河先端方向への浮氷の移動

図 17. 流出口方向への浮氷の移動
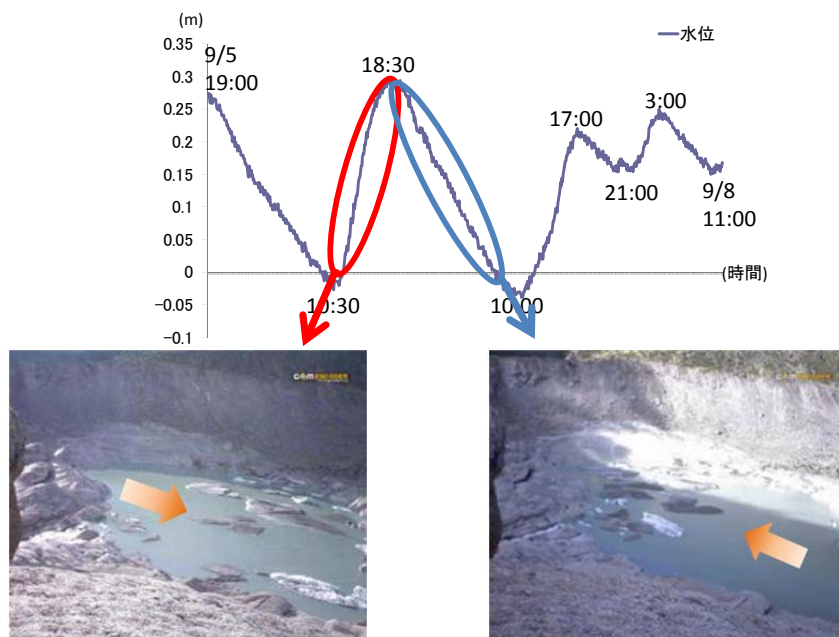
図 18. 水圧の変化と浮氷の動きの比較

4. 考察

4-1 温度の測定

温度の測定データは２つ存在する。１つは氷河湖のすぐ横の岩陰にて、大気圧と同時に計測されている。一方、氷河から少し離れた陸上においても温度の測定が行われた。両者はともに、朝方に値は小さくなり昼過ぎにかけて最大を記録するように変移している。しかしながら、その振幅については氷河から離れた気温計の方が大きく９月６日の最高気温と最低気温で１２度の差があるのに対し、氷河湖すぐ横における変動は小さく２度しかない。ここで考えられる原因として、1. 氷河湖すぐそばの気温計は氷河の影響を受けて、気温が常に低く保たれている、2. 気圧計を岩場の陰に設置したために太陽光が遮断されて気温が上昇しなかった、また空気がよどみ外気の影響をほとんど受けなかった、以上の２点が挙げられる。氷河上では冷やされた空気がその重さで下流に向けて流れ、かたば風と呼ばれる風が吹くことがあるが、これの風によって常に冷たい空気が供給され、氷河末端の湖周辺では気温が上昇しなかった可能性が考えられる。つまり、これは氷河の融解に寄与する境界条件としての周辺の気温を測定する際には、氷河から離れた地点で計測する必要性があることを示唆している。一方で気温の測定の際には、風通しの良い場所で測定することも重要な条件である。いずれにせよ、今回の測定では氷河から少し離れた陸上の気温を用いて、以降「気温」と表記する。

4-2 水圧と気温

水圧と気温は共に朝方に最小になり、昼過ぎに最大になる。しかしながらそのタイミングはわずかにずれている。気温の最大ピークは９月６日については 15:30、９月７日は 14:30 であるのに対し、水位のピークは２日とも 17:00 に生じている。また最小のタイミングに関しても同様に気温が先に変化し、水位が遅れて変化している。水位の上昇は氷河湖に流入する氷河融解水の増加を意味しているので、この結果から気温上昇に伴って氷河の融解が促進され、その融解水が氷河湖に流れ込んでいること、また融解水が氷河湖に到達するまでに時間の遅れがあることが推察される。

９月７日の午後１０時頃から、９月８日の午前３時頃にかけて夜間にも水圧が上昇している様子がわかる。これは、一見夜間にも氷河の融解が生じているかのように見えるが、この日の天候が夜から朝方にかけて雨であったことを考えると、雨水の流入によって水位が上昇したと考えた方が妥当である。

4-3 気温と水温

上記の様に、気温上昇によって氷河の融解が促進され、融解水が氷河湖に流れ込み、水圧・水位の上昇をもたらしているとすれば、水温を観測することで、その傍証ができる可能性がある。なぜならば、融解水は低温であると考えられるため、融解水の流入量増加によって水温が下がることが予想されるからである。一方で、水温は気温と同様に太陽から

の輻射熱で温められ、日中に上昇し夜間に下降することが考えられる。そこで気温と水温の比較を行った。その結果、両日とも水温は午後２時に最大となり、気温の最大ピークよりも１時間ほど早く、また水圧のピークよりも３時間ほど早い。最大値を示す順番は水温➡気温➡水圧となっており、このことから日射によって受けるエネルギー量の増加とともにまず気温と水温が上昇する。それに伴って氷河の融解が促進されるが、氷河末端に位置する氷河湖にたどり着くまでには多少の時間がかかり、水圧は遅れて上昇する。そして融解水の流入が増えることにより水温を下げる効果が働き、水温が最も早く下がり始める。次に気温が下がり始めると融解水の量も減少を始めるため、再び遅れをもって下がり始めるというプロセスを経て、一日のサイクルとなると考えられる。

4-4 氷河湖に浮かぶ氷塊の挙動

a)仮説の提案

　氷河湖に浮かぶ氷塊は一見したところは静止しているように見える。しかしながら少しずつ動いており、インターバルカメラを用いて一日の挙動を調べると、その動き方には特徴があることがわかる。主に水圧が上昇する明け方から夕方にかけての日中は、氷河の末端へと流れ、逆に水圧が下降する夜中には氷河湖の流出口の方へと移動する傾向が見られた。このことに関して、以下の仮説が挙げられる。

1. 気温が上昇する日中には氷河の融解水が氷河の下から潜り込むように流れ込み、氷河湖の底を流れる。しかし氷河湖の水位が上昇していることからもわかるように増加した融解水はすぐに流出することができず、その結果氷河湖の表面を氷河末端に向けて流れるために氷塊は氷河末端に集まる。

2. 氷河の融解が少ない夜間においては融解水の流入が少量であるため、氷河湖では流出口に向かう流れが卓越し、氷塊は流出口に移動する。

b) 仮説の検証

　氷塊を移動させる力として、融解水による流れの他に風力が挙げられる。風が氷塊自身を押す作用、また風によって生じた氷河湖表面の流れによって氷塊が押される作用が考えられる。そこで、2012 年度スイス実習報告書のうち、気象観測についてのレポートを参照した。これによると、図３のように風は氷河の流下方向に沿うようにして吹いており、その向きは昼夜で変わることがない。特に昼間に関して氷塊は風に逆らうようにして動いており、このことから氷塊の動きを昼夜で逆転させる作用が風にあるとは考えにくいことがわかる。

c)仮説の応用
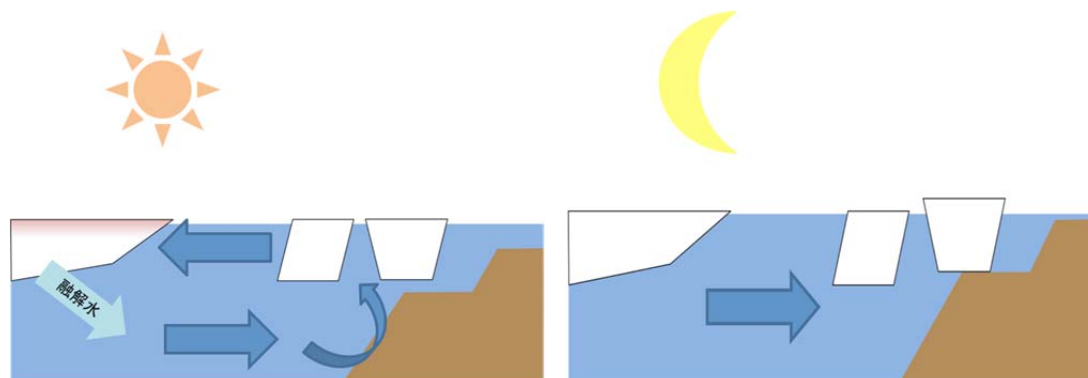
図 19. 昼間の挙動　　図 20. 夜間の挙動

今回の仮説がもし正しいとすると、昼間においては氷河の融解水は氷河湖内の循環を強化する方に働いていることになる。このとき、水面付近で温められた水は氷河末端に向かうため、より氷河の融解を促進する方向に働く可能性がある。今回の観測ではこの仮説を実証することはできなかったが、今後氷河湖内の循環を調べることによってカービング氷河の末端が湖の中で融解するプロセスの解明につながることが期待できる。

4-5 氷河湖からの流出量と氷河融解量の推定

氷河湖の水圧グラフを観察すると、水位が上昇するときも下降するときも両者は直線的に変化していることがわかる。特にそれは下降の時に顕著である。もし仮に夜間は融解水の流入がないとすると、水位の下降は流出量を表しており、グラフの傾きからその値を算定することができる。4-4 の仮説にあるように夜間においては融解水の流入よりも水口からの流出の方が卓越していると考えられ、また朝方９時ころに氷河表面を観察したところ昼間に顕著である表面融解水の流れがほとんど確認できなかった。このことから、融解水をゼロとみなす仮定は一定の妥当性があると考えられ、以下この仮定の下に議論を進める。

９月６日の午後７時から７日の午前６時までのデータに対し、直線近似を行って傾きを調べたところ、-0.24kPa/h という値になった。氷河湖は近年大きく拡大しており、その正確な面積を把握することは困難であるが、仮に 150m×200m の長方形、つまり $0.03km^2$ であるとすると、氷河湖からの流出量は $0.24*3.0*10^4/9.8=7.3*10^2m^3/h$ となる。さらに流出量が一日を通して一定であると仮定する。６日の水圧の変化を、午前 10 時半に最低値 0kPa、午後５時半に最大値 2.916kPa の値をとったとすると、氷河湖への流入による見かけの水量増加分は、$2.916/9.8*30000=8.9*10^3m^3$ である。しかしながら、この７時間で流出によって失われた分も合わせて考えると、この日の正味の氷河融解量は $8900+7.3*10^2*7=1.4*10^4m^3$ と算定することができる。今回の算定では様々な仮定を置いたが、実際には夜間においても少量の融解があると考えられ、また氷河湖からの流出量も水位に応じて変動すると考えられる。しかしながら、氷河融解量を氷河表面の標高変化からだけではなく、氷河湖の挙動を

調べることからも算定できることは大きな意義がある。今後、更なる調査を行うことで、より精細な算定が行われることが期待できる。

図 21. 横断・垂直方向移動観測による風向・風速の観測結果

5. 結論

近年の地球温暖化による氷河の後退と、それに伴う氷河湖の水位上昇、また決壊等の災害のため、氷河湖の研究が必要とされている。今回我々はスイスローヌ氷河にて氷河湖の水圧や水温、周囲の気温の測定、湖面の氷塊の動きのモニタリングを行った。その結果、水温、気温の上昇の後に水圧が上昇することが確認できた。また昼間には氷塊が氷河末端へ移動し、夜間には流出口に移動している様子が見られた。これらのことから氷河湖の水循環とその原理に対して以下のような仮設を立てた。

気温が上昇する日中には氷河の融解水が増加し、氷河の下から潜り込むように流れ込み氷河湖の底を流れる。しかし増加した融解水はすぐに流出することができず、氷河湖の表面を氷河末端に向け流れるために氷塊が氷河末端に集まる。またその際に水面で暖められた水が氷河末端へ流れ氷河を融解させるといった正のフィードバックが起こる。氷河の融解が少ない夜間においては融解水の流入が少量であるため、氷河湖では流出口に向かう流れが卓越し、氷塊は流出口に移動する。

上記の仮設が正しければ、氷河融解量を氷河表面の標高変化からだけではなく、湖面の氷塊の挙動をモニタリングすることで算定できることができ、氷河湖決壊への対策を立てる指標の一つにもなるのではないだろうか。

6．参考文献

Huss, M. and 2 others. 2008. Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. J. Geophys. Res., 133(F1), F01015. (10.1029/2007JF000803)

Tsutaki, S., Changes in ice flow regime due to proglacial lake formation in an alpine glacier, Ph. D. Dissertation

Tsutaki, S. and 3 others. 2011. Changes in glacier dynamics under the influence of proglacial lake formation in Rhonegletscher, Switzerland. Ann. Glaciol., 52(58), 31 – 36

Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M. and Truffer, M. (2009). A method to estimate ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers. J. Glaciol., 55(191), 422–430.

Sugiyama, S., Bauder, A., Zahno, C. and Funk., M. (2007). Evolution of Rhonegletscher, Switzerland, over the past 125 years and in the future: application of an improved flowline model. Annals of Glaciology, 46, 268-274.

Watanbe, Teiji, and Daniel Rothacher. "The 1994 Lugge Tsho glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya." *Mountain Research and Development* 16.1 (1996): 77-81.